

УДК 621.681.7

В.А.Румбешта, д-р техн.наук, Н.А.Симута, В.С.Подвысоцкая  
НТУ Украины «Киевский политехнический институт», г.Киев, Украина

## ИНФОРМАЦИОННО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МЕХАНООБРАБОТКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ

*В роботі розглядається важлива виробнича задача по механічній обробці деталей машин і приладів на верстатах з системами ЧПК з застосуванням необхідних для надійності такого процесу систем технічного діагностування його якості. Для побудови такої системи розроблена інформаційно-параметрична модель процесу механічної обробки, яка дозволяє вибрати ефективний вихідний параметр діагностування процесу обробки. Приводиться аналіз взаємозв'язку вихідних параметрів механічної обробки і приклад побудови системи технічної діагностики на основі моделювання технічного стану процесу з застосуванням моніторингу віброакустичної емісії.*

*An important production task is in-process examined on tooling of details of machines and devices on machine-tools with NC with the use of necessary for reliability of such process of the systems of the technical diagnosing of his quality. For the construction of such system developed informatively self-reactance model of process of tooling which allows to choose the effective initial parameter of diagnostic of process of treatment. An analysis over of intercommunication of initial parameters of tooling and example of construction of the system of technical diagnostics is brought on the basis of design of the technical process state with the use of monitoring oscillation – acoustic emission.*

### Постановка задачи.

Современное производство при механообработке деталей всё больше переходит на автоматизированное выполнение такого процесса с помощью применения станков и обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ), что дает ряд неоспоримых преимуществ. Такие механообрабатывающие системы имеют высококачественное автоматическое управление хода проведения такого процесса за счет компьютеризированных систем ЧПУ, позволяющих производить сложную обработку деталей в автоматическом режиме.

Однако такое совершенное механообрабатывающее оборудование теряет надежность качественного проведения процесса обработки деталей из-за наличия неизбежных производственных погрешностей, так как не имеет никакой информации о качестве протекания процесса резания. Это часто приводит к нарушению качества обработки, аварийным ситуациям и значительным простоям дорогостоящего оборудования [1, 2, 3].

Для устранения такого существенного недостатка и повышения качества и надежности проведения процесса механообработки (ПМО) на таком оборудовании с ЧПУ необходима установка следящих контрольно-диагностических систем автоматического определения технического состояния этого процесса. Чтобы создать такую эффективную систему диагностики ПМО, необходимо установить все задействованные параметры при этом процессе и всей обрабатывающей системы, которые влияют на качество поведения процесса механообработки.

Следовательно, параметрические исследования взаимосвязи параметров процесса резания металлов, их влияние на качество и надежность его прохождения являются базой для моделирования ПМО, потери его надежности и основной формирования системы функциональной, мониторинговой диагностики контроля качества работы технологической обрабатывающей системы (ТОС) [4, 5].

### Формирование информационно-параметрической модели ПМО.

Чтобы создать эффективную и работоспособную систему технической диагностики (СТД) для любого технологического процесса необходимо иметь его информационно-параметрическую модель (ИПМ) всех параметров процесса. Такая модель должна включать в себя все задействованные параметры всех составляющих компонентов работающей обрабатывающей системы, начиная с входных, закладываемых в процесс механообработки характеристик.

Затем должен быть разработан блок параметров самой ТОС, которые принимают участие в её работе при механообработке с включением параметров. Такие параметры ТОС генерирует под влиянием первоисточника всех нелинейных и квазилинейных процессов, которым является процесс механообработки.

Такой блок параметров работающей ТОС формирует третий блок параметров, характеризующий протекание ПМО. Здесь должны быть учтены такие параметры процесса механообработки, как переменная сила резания, величина которой с одной стороны определяется режимами резания, а с другой – величиной нарастающего износа инструмента, что делает её квазипериодической, растущей величиной, а также такие важные параметры процесса, как его динамика, температура и потребляемая им мощность.

В конце ИПМ должен быть представлен информационный блок всех выходных параметров механообработки, которые из-за нарастания износа режущего инструмента и увеличения из-за этого силы резания и всех других параметров будут также всегда переменными [4]. Своим изменением они, естественно, будут отражать техническое состояние ПМО и его качество, что и служит информативной базой для разработки СТД механообработки.

На рис. 1 представлена такая информационная модель процесса механообработки, разработанная на основе вышеизложенного, которая включает в себе четыре расположенных последовательно блока всех задействованных в процессе параметров.

Первый блок – «Вход» показывает входные параметры процесса, как величины режимов обработки деталей – скорости резания  $v$  и подачи  $S_0$ , а также переменное значение глубины резания  $(t+\Delta t)$  из-за погрешностей изготовления и установки заготовки на станке  $(L_3+\Delta L_3)$ . Здесь так же отражены переменные величины прочности заготовок  $(HB_3+\Delta HB_3)$ , погрешности настройки станка «на размер» в виде  $(L_H+\Delta L_H)$  и потребляемая мощность  $N$  двигателя.

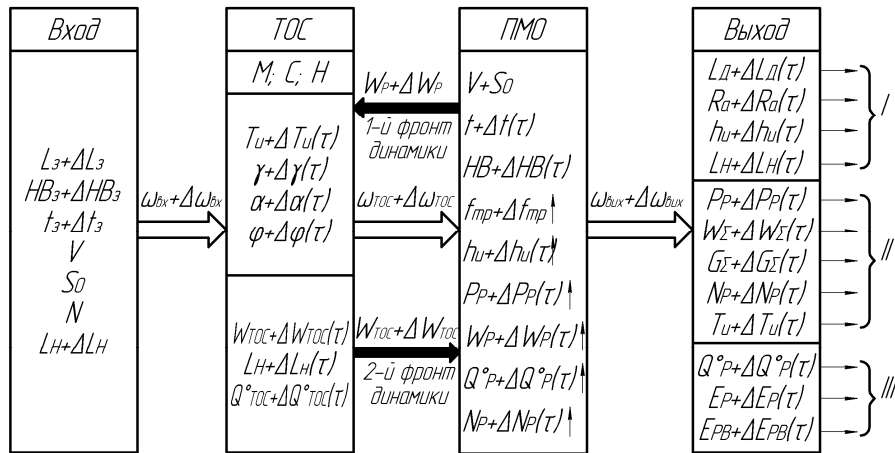


Рис. 1. Информационно-параметрическая модель процесса механообработки

Второй блок – «ТОС» представляет все основные параметры обрабатывающей системы в виде её важнейших динамических характеристик: массы –  $M$ , жесткости –  $C$  и упруго-диссипативных характеристик –  $H$ . Сюда входят все характеристики применяемого режущего инструмента, его стойкости  $(T_H+\Delta T_H)$ , всех его углов – переднего  $\gamma$ , заднего  $\alpha$  и в плане  $\phi$ , которые при работе обрабатывающей системы меняются из-за неизбежного износа инструмента. В этот блок вводятся такие сопутствующие переменные параметры, как генерируемая резанием вибродинамика станка  $(W_{ТОС}+\Delta W_{ТОС})$ , температура инструмента  $(\Theta_{ТОС}^\circ + \Delta\Theta_{ТОС}^\circ)$ , а параметры настройки станка «на размер»  $(L_H+\Delta L_H)$ , которые все меняют свою величину по ходу времени обработки  $(\tau)$  партии деталей.

Третий блок – «ПМО» несет информацию обо всех параметрах, сопровождающих процесс механообработки где постоянным являются только установленные скорость резания  $V$  и подача инструмента  $S_0$ , а все остальные параметры являются переменными по времени  $(\tau)$ . При этом глубина резания  $(t+\Delta t)$  и прочность обрабатываемого материала являются случайно-переменными в определенных пределах, а все остальные параметры процесса по ходу обработки партии деталей являются постепенно нарастающими по времени. Это величина трения  $(f_{тр}+\Delta f_{тр})$ , износ инструмента  $(h_{И}+\Delta h_{И})$  и растущее из-за этого сила резания  $(P_R+\Delta P_R)$ , температура резания  $(\Theta_R^\circ + \Delta\Theta_R^\circ)$  и потребляемая мощность процесса  $(N_R+\Delta N_R)$ . При этом на ИПМ показаны взаимозависимость и взаимовлияние параметров по динамике механообработки между ПМО и ТОС, что является также одной из причин потери качества ПМО.

Четвертый блок – «Выход» несет информацию о всех возможных выходных параметрах процесса, которые по мере обработки партии деталей по времени  $(\tau)$ , износа режущего инструмента и роста силы резания, являются переменными, растущими по величине параметрами. Это получения размера детали с погрешностью  $(L_d+\Delta L_d)$  и чистоты её поверхности обработки  $(Ra+\Delta Ra)$ , а также величины износа инструмента  $(h_{И}+\Delta h_{И})$ , погрешности настройки станка  $(L_H+\Delta L_H)$ , растущие параметры силы резания  $(P_R+\Delta P_R)$ , динамики системы  $(W_\Sigma+\Delta W_\Sigma)$ , её виброакустической эмиссии  $(G_{Р\Sigma}+\Delta G_{Р\Sigma})$ , потребляемой мощности  $(N_R+\Delta N_R)$ , падения стойкости инструмента  $(T_H+\Delta T_H)$ , а также рост физических параметров, как температура резания  $(\Theta_R^\circ + \Delta\Theta_R^\circ)$ , термо-ЭДС резания  $(E_P+\Delta E_P)$  и радиоволновых процессов  $(E_{PB}+\Delta E_{PB})$ .

При этом все они относятся к трем группам по физической природе параметра: размерно-геометрические, физико-механические, физические и могут своими изменениями по ходу проведения процесса нести информацию о техническом состоянии процесса механообработки и контролировать его годность.

На базе такого изменения выходных параметров процесса механообработки и строятся методологии управления качеством изготовления деталей на станках и формирование системы технической диагностики такого процесса.

Все эти выходные параметры, как производные процесса механической обработки, имеют между собой сложную функциональную взаимосвязь. Такую функционально-параметрическую модель взаимосвязи на основе схематичной зависимости этих параметров можно представить в виде схемы, показанной на рис. 2, где отражены различные ветви их зарождения по трем ветвям.

Как отмечалось выше, причину потери качественной надежности и появления признака отказа ПМО является нарастающий износ режущего инструмента  $\Delta h_{И}$  из-за наличия силового трения и генерирования им роста динамической составляющей силы резания  $\Delta P_{дин}$ . А она, в свою очередь, увеличивает  $\Delta h_{И}$ .

Поэтому эти два основных параметра являются главными в потере надежности ПМО, и они генерируют все остальные параметры процесса и их рост.

Так  $\Delta h_{И}$  вызывает рост шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  и изменение величины настроечного размера  $\Delta L_H$ , что в свою очередь вызывает погрешность  $\Delta L_d$  изготовления размера детали (ветвь А).

Увеличение величины  $\Delta P_{дин}$  ведет к росту потребляемой мощности  $\Delta N_R$ , динамики обрабатывающей системы

$\Delta W_{\Sigma}$  и падению из-за этого стойкости инструмента  $\Delta T_H$  (ветвь С).

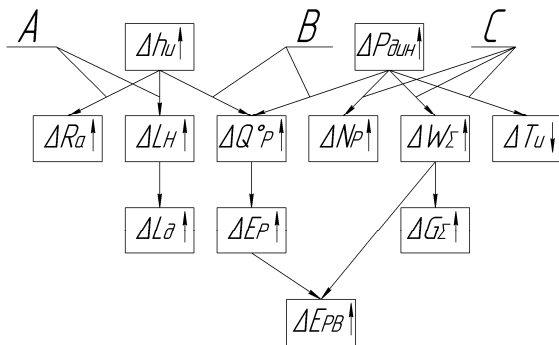


Рис. 2. Функционально-параметрическая модель механообработки

излучаемых в пространство с разным спектром частот и мощности, в зависимости от напряжения в цепи.

#### Диагностика процесса механообработки.

Функциональное диагностирование – это наиболее сложная и совершенная процедура анализа качества работы объекта и представляет собой метрологическую процедуру постоянного мониторинга параметров работы сложной технической системы и проверки точности и надежности работы этой системы и её технического состояния с целью своевременного распознавания дефекта.

Часто главные параметры качества работы различных систем и процессов обладают плохой контролепригодностью. В таких случаях прибегают к косвенному методу ТД, когда вместо непригодного к измерению главного параметра  $Q_i$  выбирают другой, из числа всех выходящих сигналов иных параметров, которые генерирует работающий объект. Такой параметр – спутник, должен быть тесно связан с главным параметром  $Q_i$  и при работе объекта адекватно менять свою величину, т.е. иметь тесную функциональную связь, желательно прямую, и аналогичную динамику изменения по времени ( $\tau$ ).

В качестве параметра-спутника принимается виброакустический сигнал:

$$G_i(\tau) = \varphi(Q_i(\tau))$$

Однако, конечно, такой параметр – спутник, другой физической природы по отношению к  $Q_i$ , что естественно измеряется другими единицами измерения и имеет другой энергетический уровень. Тогда, при прямой зависимости, параметр – спутник  $G_i(\tau)$  можно связать по величине с главным параметром, как генератором этой величины, таким соотношением:

$$\varphi_g(G_i(\tau)) = A_{Qg} \varphi(Q_i(\tau))$$

где  $A_{Qg}$  – масштабный коэффициент перечисления величины  $Q_i$  в  $G_i$ .

Чтобы перейти к таким расчетам, необходимо установить передаточную функцию (или уравнение связи) между данными величинами, которые обычно записывают в виде производной части:

$$\left( \frac{\partial G_i(\tau)}{\partial Q_i(\tau)} \right)$$

Тогда при диагностировании проводится мониторинг величины  $G_i(\tau)$  со снятием сигнала через отрезок заданного времени ( $\Delta\tau$ ), величина которого выбирается из условия скорости развития дефекта  $\Delta Q_i(\Delta\tau)$ . Измеряется величина изменения параметра – спутника  $G_i(\tau)$  в виде  $\Delta G_i(\tau)$  от изменения главного параметра  $Q_i(\tau)$ :

$$\Delta G_i(\tau) = A_{Qg} \left( \frac{\partial G_i(\tau)}{\partial Q_i(\tau)} \right) \Delta Q_i(\tau)$$

На основании полученного из объекта сигнала по изменению спутника на величину  $\Delta G_i(\tau)$  определяется уровень изменения главного параметра качества данного объекта величины  $Q_i(\tau)$ :

$$\Delta Q_i(\tau) = A_{gQ} \left( \frac{\partial Q_i(\tau)}{\partial G_i(\tau)} \right) \Delta G(\tau)$$

где  $A_{Qg}$  – обратный масштабный коэффициент перечисления от  $G_i$  на  $Q_i$ .

Процесс протекает нормально, если полученное значение  $\Delta Q_i$ , которое отражает своим изменением уровень годности протекания механообработки в данное время регистрации  $\tau$ , находится в допустимых пределах, т. е. между крайними заданными границами  $Q_{max}$  и  $Q_{min}$  при условии:

$$[Q_{min} < Q_i(\tau) < Q_{max}]$$

Это условие легко реализуется двумя критическими уровнями сигнала о пригодности обработки, а регистрируемый сигнал имеет возможность вариации между ними.

Как вспоминалось выше, много характеристик процесса резания могут меняться по времени в процессе механообработки. По мере изнашивания режущего инструмента растут силы резания и температура, вибрация системы и другие характеристики. Будет расти к верхнему пределу и показатель качества процесса  $Q_i(\tau)$ . Скорость

Увеличение динамики системы  $\Delta W_{\Sigma}$  генерирует приращение в её металло-схеме ТОС виброакустической эмиссии  $\Delta G_{\Sigma}$ .

Средняя ветвь схемы В показывает генерирование износом инструмента и динамической составляющей силы резания температуры резания  $\Delta \Theta_P^\circ$ , как термоградиента в зоне срезания стружки, что, в свою очередь, из-за наличия естественных термопары инструмент–деталь, вызывает появление термо-ЭДС резания в виде микротока  $\Delta E_P$ .

Увеличение по мере проведения процесса механообработки термо-ЭДС резания с одной стороны и вибродинамики всей обрабатываемой системы  $\Delta W_{\Sigma}$  вызывает частотные разрывы электрической цепи в термопаре «инструмент–деталь», что приводит к частотным колебаниям термо-ЭДС резания. Это порождает возникновение и увеличение электромагнитных волн, обозначенных на схеме  $\Delta E_{PB}$  – радиоволн из зоны резания,

данного изменения, как средняя величина  $\bar{v}_Q$  может быть ориентировочно определена на основании статистических данных и функциональной зависимости  $Q_i(\tau) = f[x_i(\tau)]$  при моделировании процесса с учетом входных данных.

На основании таких расчетов строится график зависимости параметра  $Q_i$  по времени  $\tau$  (рис. 3).

где  $Q_{ip}$  – это линия изменения расчетного (теоретического) значения анализируемого параметра в заданных пределах  $Q_{max}$  и  $Q_{min}$ .

В реальных условиях через разные отклонения и возбуждения действительная кривая действительного обмериваемого параметра  $Q_{id}$  будет отличаться от расчетной зависимости. Анализ возможных отклонений этого параметра по времени протекания процесса можно проследить на основании динамического движения точки на плоскости, которая описывается уравнением:

$$Q_i(t) = Q_0 + \Delta Q_i(t) + \frac{dQ_i(t)}{dt} \Delta t + \frac{d^2 Q_i(t)}{dt^2} (\Delta t)^2$$

где  $Q_0$  – определяет начальное состояние параметра,  $\Delta Q_i(t)$  – значение параметра в момент измерения  $t$ ,  $\frac{dQ_i(t)}{dt} \Delta t$

– скорость изменения параметра за промежуток времени мониторинга  $\Delta t$ , а  $\frac{d^2 Q_i(t)}{dt^2} (\Delta t)^2$  – показывает изменение

скорости изменения параметра. Две последние составляющие дают нам понятие о потере качества и надежности работы объекта и появлении признаков отказа. При нормальной динамике развития дефекта должно выполняться условие:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial t} \Delta t \cong const \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial t^2} (\Delta t^2) = 0 \end{cases}$$

Момент потери динамической устойчивости и, соответственно, потери качества и надежности работы объекта отвечает условию:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial t} \Delta t \neq const \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial t^2} (\Delta t^2) > 0 \end{cases}$$

То есть по динамике изменения процесса работы объекта можно диагностировать его качественное состояние и предсказать надежность его развития.

#### Выводы.

На основании выше изложенного можно сделать вывод, что все выходные переменные по величине параметры процесса механообработки несут своей динамикой и величиной своего изменения информацию о техническом состоянии процесса механообработки и потому могут быть базой для разработки СТД данного процесса.

Качество и эффективность такой СТД будет во многом определяться контролепригодностью критерия принятого за диагностический признак выходного параметра.

Для создания такой СТД предложена математическая модель развития процесса. Для построения СТД необходима дальнейшая работа по разработке математического и программного обеспечения по распознаванию нарастающего дефекта в процессе механообработки деталей. Такую работу целесообразно проводить на основе предложенных информационно-параметрической модели процесса и математической модели поведения процесса или технического объекта по времени.

#### Список литературы.

1. Румбешта В.А., Кокаровцев В.В., Харкевич А.Г. Организация системы диагностики инструмента в процессе механообработки. / Сб. «Стойкость и диагностика инструмента в условиях автоматизированного производства», ЦДНТИ, Ижевск, 1988. – с. 102-106.
2. Румбешта В.О., Ткачук В.О. Керування точністю на металооброблювальних верстатах з ЧПК. / Вісник НТУУ «КПІ», серія «Машинобудування», № 51, – 2008. – с. 19-25.
3. Румбешта В.О., Гнатейко Н.В. Вплив розмірного зносу ріжучого інструменту на динамічну стійкість обробляючого верстату. / Наукові вісті Житомирського інженерно-технічного інституту, № 33, ЖІТІ, 2008. – с. 57-61.
4. Румбешта В.А., Слипченко В.П. Диагностика потери надежности технологического процесса точением. / Вісник НТУУ «КПІ», серія «Приладобудування», №35, – 2008. – с. 104-112.
5. Симута Н.А., Румбешта В.А., Подвысоцкая В.С. Диагностика технического состояния режущего инструмента при механообработке. / Вісник НТУУ «КПІ», серія «Приладобудування», № , – 2010. – с.

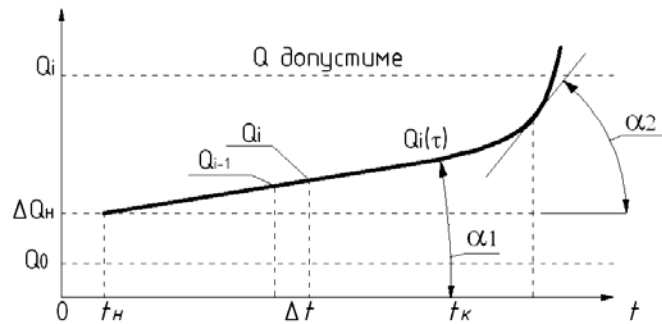


Рис. 3. Схема изменения величины Q при диагностировании